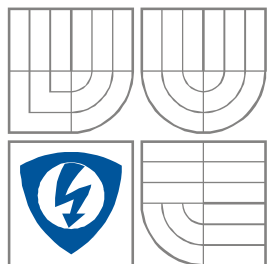


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Přípravek pro demonstraci funkce základních typů oscilátorů

Preparation for function demonstration of basic types of oscillators

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

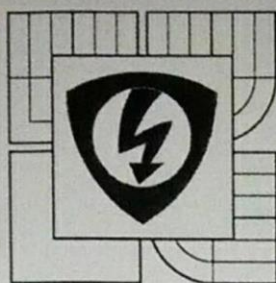
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jaroslav Venhoda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO, 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jaroslav Venhoda

Ročník: 3

ID: 164434

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Přípravek pro demonstraci funkce základních typů oscilátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními typy oscilátorů a proveďte výběr jejich typických představitelů. Navrhněte úplná obvodová zapojení alespoň 3 vybraných typů oscilátorů a proveďte simulaci jejich funkce v programu PSpice. Navrhněte koncepci laboratorního přípravku s možností jeho řízení pomocí PC.

Proveďte konstrukci laboratorního přípravku umožňujícího volbu typu oscilátoru, snímání a zobrazení výstupního napětí na PC. Vyberte vhodné hardwarové prostředky do měřicího systému a vytvořte obslužný program pro PC ve vhodném programovém prostředí. Připravte podklady pro demonstrační laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LÁNÍČEK, R. Elektronika - obvody, součástky, děje. Praha: BEN - technická literatura, 1998.

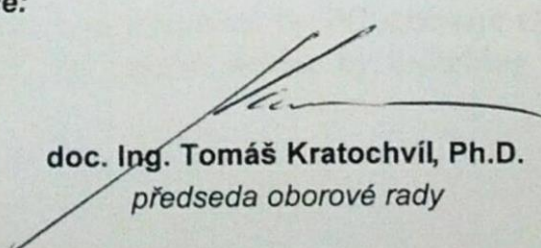
[2] KAINKA, B. Měření, řízení a regulace pomocí PC - Vývoj hardwaru a softwaru pro praxi. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce v úvodu pojednává o základních typech oscilátorů a jejich rozčlenění do skupin podle charakteru zapojení. Pro praktickou realizaci přípravku bylo vybráno čtyř různých druhů zapojení. Byl proveden návrh úplných obvodových zapojení. Funkce návrhu byla následně ověřena simulací na PC programem OrCAD PSpice. Návrh zahrnuje možnost řízení přípravku pomocí PC s možností přepínání výstupů a laděním kmitočtu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Oscilátory, zpětnovazební oscilátory, LC oscilátory, Colpittsův oscilátor, oscilátor se záporným diferenciálním odporem, oscilátor s Wienovým článkem, tunelová dioda, digitální potenciometry, SPI komunikace

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with basic types of oscillators. Oscillators were divided into groups in the introduction. For the practical implementation was chosen four different types of oscillators. For each type of selected oscillator was done circuit design. Subsequently, the design was simulated by PC software OrCAD PSpice. The proposal includes a possibility of the control device by switching between outputs and tuning oscillator's frequency.

KEYWORDS

Oscillators, feedback oscillators, LC oscillators, Collpits oscillator, negative differential resistance oscillator, Wien bridge oscilátor, tunnel diode, digital potentiometers, SPI

VENHODA, J. *Přípravek pro demonstraci funkce základních typů oscilátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 28 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Přípravek pro demonstraci funkce základních typů oscilátorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Oscilátory obecně	2
2 Rozdělení oscilátorů	2
2.1 Oscilátory se záporným diferenciálním odporem	2
2.2 Zpětnovazební oscilátory	3
2.2.1 Oscilační podmínky	3
2.2.2 Meissnerovo zapojení	4
2.3 Tříbodové oscilátory	5
2.3.1 Obecné zapojení	5
2.3.2 Hartleyho zapojení	6
2.3.3 Colpittsovo zapojení	7
2.3.4 Krystalové oscilátory	8
2.4 RC oscilátory	9
2.4.1 Oscilátor s Wienovým článkem	10
2.5 Ladění pracovního kmitočtu oscilátoru	10
3 Návrh přípravku	11
3.1 Návrh oscilátoru s Wienovým článkem	11
3.2 Návrh Colpittsova oscilátoru	13
3.3 Návrh Meissnerova oscilátoru	15
3.4 Návrh oscilátoru s tunelovou diodou	16
3.5 Napájení	18
3.6 Ladění kmitočtu	18
3.7 Řízení přípravku	19
3.8 Programová část	21
3.8.1 Program mikroprocesoru	21
3.8.2 Obslužný program pro PC	23

4	Měření	24
4.1	Měření Colpittsova oscilátoru.....	24
4.2	Měření Meissnerova oscilátoru.....	25
4.3	Měření Wienova oscilátoru.....	26
5	Závěr	28
	Literatura	29
A	Simulace zapojení	30
A.1	Simulace oscilátoru s Wienovým článkem.....	30
A.2	Simulace Colpittsova oscilátoru	30
A.3	Simulace Meissnerova oscilátoru	31
B	Návrh zařízení	31
B.1	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	31
B.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	32
B.3	Osazovací plán – strana bottom	33
B.4	Osazovací plán – strana top	34
B.5	Seznam součástek	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 V-A charakteristika a) typ S b) typ N [1].....	2
Obrázek 2.2 Zapojení oscilátoru s tunelovou diodou [1].....	3
Obrázek 2.3 Principiální schéma zesilovače se zpětnou vazbou	3
Obrázek 2.4 Meissnerovo zapojení - principiální schéma	5
Obrázek 2.5 Obecné zapojení tříbodových oscilátorů	5
Obrázek 2.6 Hartleyho zapojení	7
Obrázek 2.7 Colpittsovo zapojení.....	8
Obrázek 2.8 Tříbodové zapojení s krystalem	8
Obrázek 2.9 Oscilátor s krystalem v sériové rezonanci.....	9
Obrázek 2.10 Oscilátor s krystalem ve zpětné vazbě	9
Obrázek 2.11 Oscilátor s Wienovým článkem	10
Obrázek 2.12 Ladění rezonančního obvodu varikapem	11
Obrázek 3.1 Oscilátor s Wienovým článkem - úplné zapojení.....	13
Obrázek 3.2 Colpittsův oscilátor - úplné zapojení.....	15
Obrázek 3.3 Meissnerův oscilátor - úplné zapojení.....	16
Obrázek 3.4 V-A charakteristika tunelové diody	16
Obrázek 3.5 Zapojení oscilátoru s tunelovou diodou	17
Obrázek 3.6 Stabilizátor napájecího napětí	18
Obrázek 3.7 Ladění kmitočtu.....	19
Obrázek 3.8 Zapojení MCU s převodníkem úrovní MAX232	19
Obrázek 3.9 Schéma zapojení MCU a multiplexoru	20
Obrázek 3.10 Vývojový diagram programu pro MCU	22
Obrázek 3.11 Uživatelské rozhraní obslužného programu pro PC.....	23
Obrázek 4.1 Graf závislosti frekvence a vstupního slova.....	24
Obrázek 4.2 Colpittsův oscilátor - změřený průběh výstupního napětí.....	25
Obrázek 4.3 Meissnerův oscilátor - změřený průběh výstupního napětí.....	25
Obrázek 4.4 Wienův oscilátor – výstupní průběh na nejnižší frekvenci	26
Obrázek 4.5 Wienův oscilátor – výstupní průběh na střední frekvenci.....	26
Obrázek 4.6 Wienův oscilátor – výstupní průběh na nejvyšší frekvenci.....	27
Obrázek 4.7 Wienův oscilátor - graf závislosti frekvence a vstupního slova.....	27

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Zaokrouhlené hodnoty do řady E24	14
Tabulka 2 Významné hodnoty V-A charekteristiky tunelové diody	17
Tabulka 3 Naměřené hodnoty frekvence a ladícího napětí.....	24

ÚVOD

Tato bakalářská práce řeší návrh a praktickou realizaci přípravku pro demonstraci základních typů oscilátorů. Po teoretickém úvodu do problematiky oscilátorů je proveden návrh čtyř různých obvodových zapojení. Pro návrh byli vybráni dva zastupitelé LC oscilátorů, konkrétně Colpittsovo a Meissnerovo zapojení. Ze skupiny RC oscilátorů bylo vybráno zapojení Wienova oscilátoru. Jako poslední bylo zvoleno zapojení oscilátoru se záporným diferenciálním odporem realizovaným tunelovou diodou. Následně byl proveden návrh úplných obvodových zapojení a jeho simulace v programu OrCAD PSpice. Dále byla pro návrh uvažována možnost přeladění kmitočtu pomocí varikapů. Pro jejich řízení byly použity digitální potenciometry ve spojení s mikroprocesorem. Pro řízení celého přípravku pomocí PC bylo navrženo jednoduché uživatelské prostředí umožňující přepínání mezi jednotlivými oscilátory a ladění kmitočtu.

1 OSCILÁTORY OBECNĚ

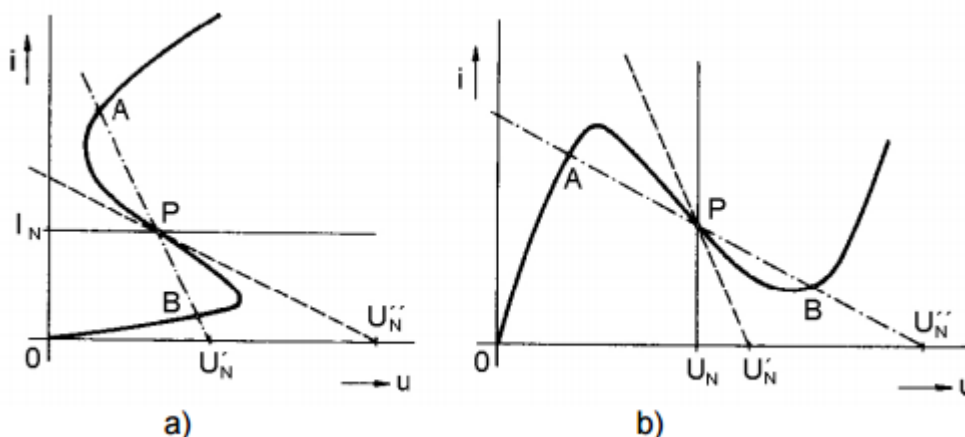
Oscilátory jsou generátory harmonického signálu. Mohou být považovány za měniče stejnosměrného signálu na signál střídavý. Podle principu činnosti se dělí na oscilátory se záporným diferenciálním odporem a oscilátory zpětnovazební.

Další dělení dle prvků, které definují oscilační kmitočet je na RC oscilátory, LC oscilátory a krystalové oscilátory. Rezonanční obvod složený z reálných součástek, které mají parazitní vlastnosti, není schopen udržet stálou amplitudu kmitů. Ta s rostoucím časem vlivem ztrát klesá. Proto se k obvodu přidává aktivní prvek, který pomocí zpětné vazby dodává energii, která byla vlivem ztrát přeměněna. [1]

2 ROZDĚLENÍ OSCILÁTORŮ

2.1 Oscilátory se záporným diferenciálním odporem

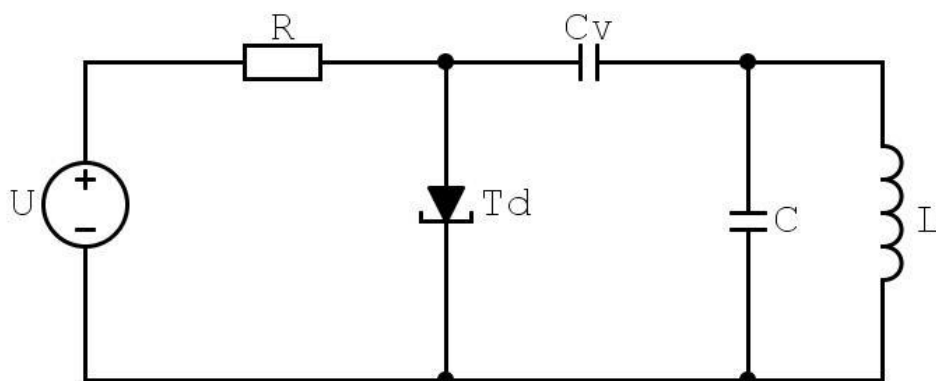
Tento druh oscilátorů pracuje na principu vykompenzování ztrát rezonačního obvodu. Tato kompenzace se provádí připojením prvku, který má danou vlastnost – záporný diferenciální odpor. Tento prvek v určitém intervalu své voltampérové charakteristiky vykazuje záporný diferenciální odpor. Prvky se dělí podle tvaru V-A charakteristiky na typ S a typ N. V následujícím zapojení je použita tunelová dioda.



Obrázek 2.1 V-A charakteristika a) typ S b) typ N [1]

Tunelová dioda je připojena paralelně k rezonačnímu obvodu. Zdroj stejnosměrného napětí a rezistor R nastavují klidový pracovní bod tunelové diody do středu oblasti záporného diferenciálního odporu, jak je naznačeno na obrázku 2.1. Kondenzátor C_v

slouží jako vazební, prvky L a C pak definují rezonanční kmitočet oscilátoru. [1]



Obrázek 2.2 Zapojení oscilátoru s tunelovou diodou [1]

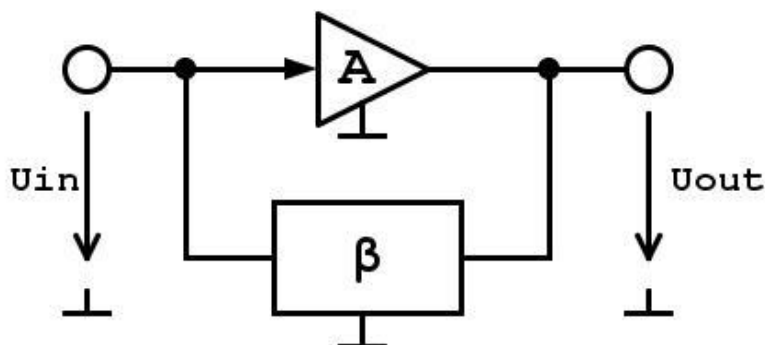
2.2 Zpětnovazební oscilátory

U těchto typů oscilátorů se vyskytuje aktivní prvek (zesilovač), který dodává do rezonančního obvodu potřebnou energii k udržení stálé amplitudy kmitů. Vyrovnává tak ztráty v rezonančním obvodu způsobené vlivem parazitních vlastností reálných součástek. Dále je zde zavedena kladná zpětná vazba řídící aktivní prvek. [1]

Podmínkami pro nasazení a stálost kmitů se zabývá následující podkapitola.

2.2.1 Oscilační podmínky

Nechť se v obvodu vyskytuje zesilovač se zesílením A a zpětnovazebním obvodem s přenosem β jak je uvedeno na obrázku níže.



Obrázek 2.3 Principiální schéma zesilovače se zpětnou vazbou

Zesílení je pak definováno následovně:

$$A = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (1)$$

Zesilovač je doplněn zpětnovazebním obvodem s přenosem:

$$\beta = \frac{U_{in}}{U_{out}} \quad (2)$$

Potom se celkový přenos soustavy rovná:

$$A' = \frac{A}{1 - \beta A} \quad (3)$$

Z této rovnice vyplývají následující podmínky pro vznik oscilací.

1) Amplitudová podmínka

$$\beta A = 1 \quad (4)$$

Z této rovnice vyplývá, že pro správnou funkci oscilátoru musí být zesílení a zpětná vazba vůči sobě vykompenzované.

2) Fázová podmínka

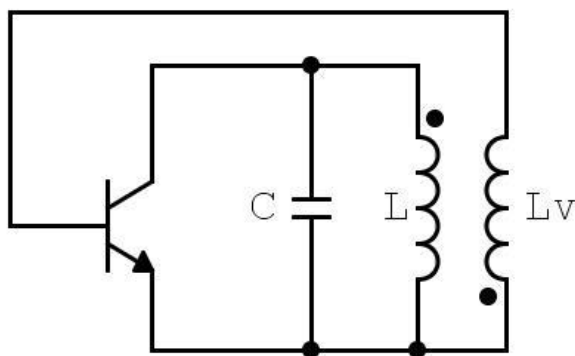
$$\varphi_{Au} + \varphi_{\beta} = 0 + 2k\pi \quad (5)$$

Tato podmínka definuje, že zpětnovazební signál přiváděný zpět na vstup musí být se vstupním signálem ve fázi.

2.2.2 Meissnerovo zapojení

Tato podkapitola zmiňuje Meissnerův oscilátor s induktivní vazbou. Další možné zapojení je Armstrongovo a Reinartzovo zapojení. Základem tohoto zapojení je rezonační LC obvod, který definuje kmitočet oscilátoru. Dále je zde zavedena kladná zpětná vazba pomocí transformátoru z kolektoru do báze tranzistoru. Jsou zde také naznačeny začátky vinutí cívek primáru a sekundáru, které je nutné pro splnění fázové podmínky oscilací.

[1]



Obrázek 2.4 Meissnerovo zapojení - principiální schéma

Přenos zpětné vazby je určen poměrem indukčností sekundárního a primárního vinutí podle následujícího vztahu:

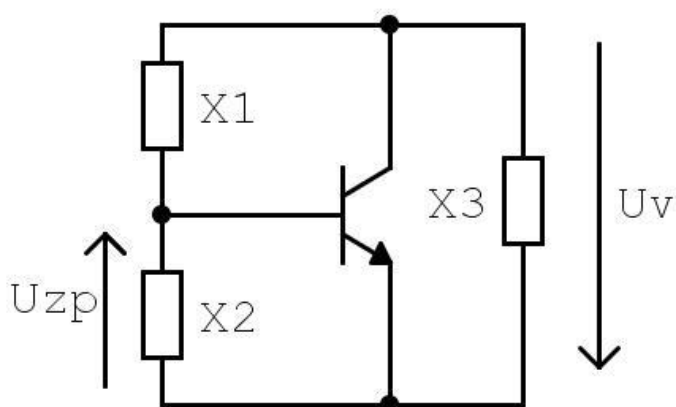
$$\beta = \frac{L_v}{L} \quad (6)$$

2.3 Tříbodové oscilátory

Následující kapitola se zabývá oscilátory v tříbodovém zapojení. V úvodu je popsán základní princip a dále je uvedeno několik představitelů této skupiny.

2.3.1 Obecné zapojení

Obecné zapojení tříbodových oscilátorů se skládá z tranzistoru, k němuž jsou připojeny ve třech bodech obecné reaktance X1, X2 a X3.



Obrázek 2.5 Obecné zapojení tříbodových oscilátorů

Tranzistor v zapojení se společným emitorem vytváří fázový posuv mezi vstupním a výstupním napětím 180° . Přenos ve zpětné vazbě musí zajistit kompenzaci toho posunu tak, aby byla splněna fázová podmínka oscilací (5). Rezonanční kmitočet zapojení vychází z podmínky:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \quad (7)$$

Činitel přenosu zpětné vazby je definován následovně:

$$\beta = \frac{U_{zp}}{U_v} = \frac{X_2}{X_3} \quad (8)$$

Z následujících podmínek vyplývá, že reaktance X_2 a X_3 musí být stejného charakteru, zatímco X_1 charakteru opačného vzhledem k předcházejícím. Zpětnou vazbu tak může definovat dvojice kondenzátorů doplněná induktorem (Colpittsovo zapojení) nebo dvojice induktorů ve zpětné vazbě, doplněná o kondenzátor (Hartleyho zapojení). Těmito zapojeními se zabývají následující podkapitoly. [1]

2.3.2 Hartleyho zapojení

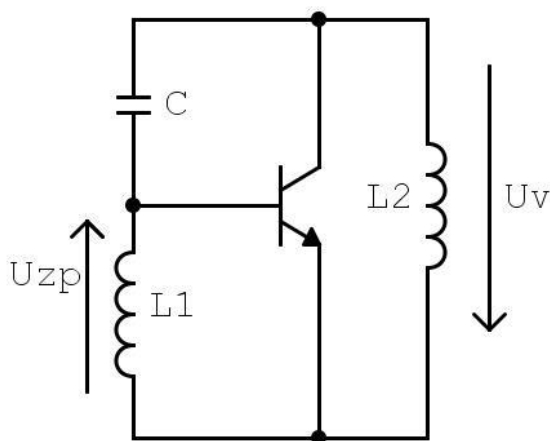
Jedná se o oscilátor s indukčním děličem napětí ve zpětné vazbě. Rezonanční kmitočet je určen sériovou kombinací cívek L_1 a L_2 a kondenzátorem C :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C(L_1 + L_2)}} \quad (9)$$

Vztah pro přenos zpětné vazby vychází z obecného zapojení třibodových oscilátorů:

$$\beta = \frac{L_1}{L_2} \quad (10)$$

Pro splnění amplitudové podmínky je nutné zvolit vhodný poměr cívek s ohledem na zesílení tranzistorového stupně.



Obrázek 2.6 Hartleyho zapojení

2.3.3 Colpittsovo zapojení

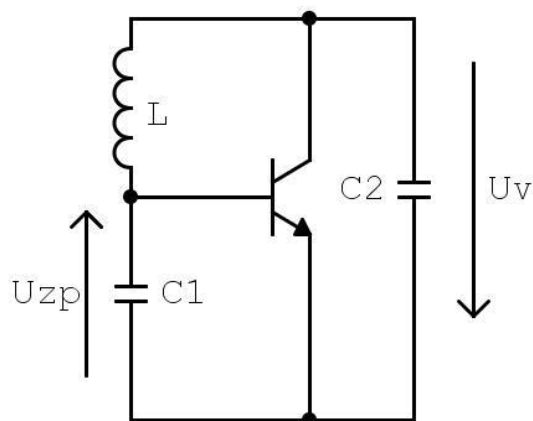
Narozdíl od Hartleyova zapojení zde figuruje ve zpětné vazbě kapacitní dělič. Rezonanční kmitočet oscilátoru určuje sériová kombinace C_1 a C_2 s cívkou L .

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (11)$$

Vztah pro přenos zpětné vazby vychází z obecného zapojení třibodových oscilátorů:

$$\beta = \frac{C_2}{C_1} \quad (12)$$

Splnění amplitudové podmínky je dáno poměrem kapacit, který musí vyhovovat zesílení tranzistorového stupně. Fázová podmínka je zajištěna uzemněním středu kapacitního děliče, které posune fázi o 180° .



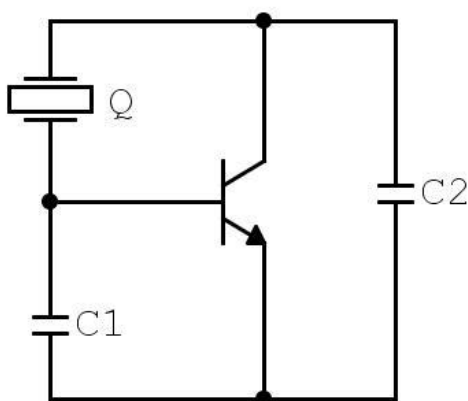
Obrázek 2.7 Colpittsovo zapojení

U příkladů třibodových zapojení se vždy vyskytuje pouze principiální schéma obvodu. Úplné obvodové zapojení je předmětem návrhu přípravku v pozdější kapitole.

2.3.4 Krystalové oscilátory

U těchto typů oscilátoru se v zapojení vyskytuje piezokrystalický rezonátor tzv. krystal. Je to rezonanční obvod s velmi vysokým činitelem jakosti Q (10 000 a více). Obvody s krystalem dosahují značné selektivity tzn. pracují ve velmi úzkém pásmu okolo rezonančního kmitočtu s vysokou stabilitou. Dále jsou uvedeny tři různá zapojení s krystalem.

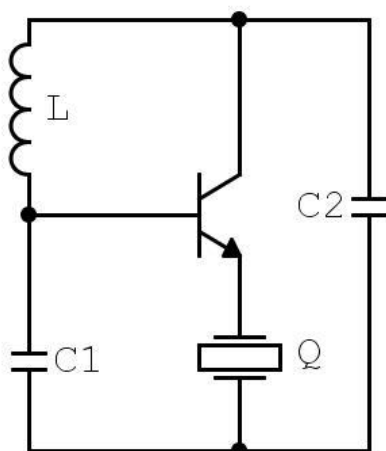
Prvním zapojením je třibodové zapojení oscilátoru, v němž jednu z reaktancí nahrazuje právě krystal, který se zapojuje mezi 2 různé elektrody tranzistoru.



Obrázek 2.8 Třibodové zapojení s krystalem

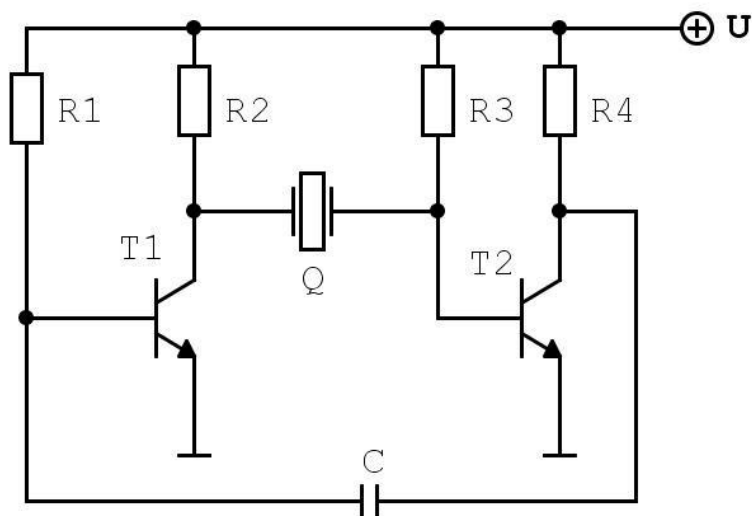
Na obrázku 2.8 je uvedeno zapojení třibodového oscilátoru, kde je nahrazen induktor krystalem. Ten zde pracuje v blízkosti paralelní rezonance a vykazuje induktivní charakter. Třibodová zapojení s krystalem se rozdělují podle způsobu zapojení tranzistoru v obvodu (zapojení SE – Pierceův oscilátor, SB – Clappův oscilátor, SC – Colpittsův oscilátor). [1]

V následujícím příkladu zapojení na obrázku 2.9 je krystal připojen pouze k jedné elektrodě tranzistoru. Pracuje na kmitočtu sériové rezonance.



Obrázek 2.9 Oscilátor s krystalem v sériové rezonanci

V posledním příkladu zapojení na obrázku 2.10 pracuje krystal v sériovém zapojení a uzavírá smyčku zpětné vazby.



Obrázek 2.10 Oscilátor s krystalem ve zpětné vazbě

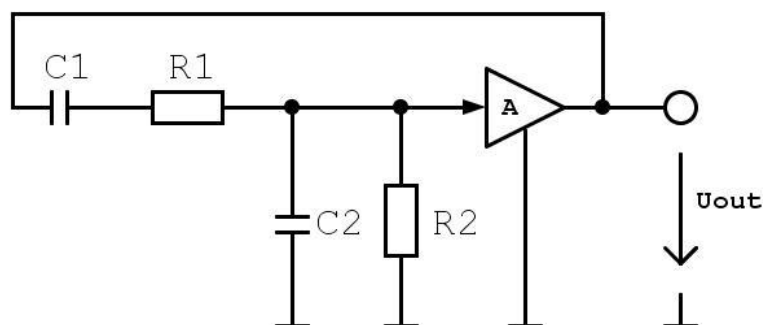
2.4 RC oscilátory

Princip těchto oscilátorů opět spočívá v zavedení kladné zpětné vazby. Tyto oscilátory nacházejí uplatnění v nízkofrekvenční technice, jelikož cívky se na takto nízkých kmitočtech obtížně vyrábějí. V těchto obvodech tak figuruje selektivní RC člen v různých zapojeních.

2.4.1 Oscilátor s Wienovým článkem

Oscilátor s Wienovým článkem je jedním z typických představitelů této skupiny. Jedná se o můstkové zapojení oscilátoru. Wienův článek je pásmová propust 2. řádu s mezním kmitočtem, který definuje vztah (13). Na tomto kmitočtu je fázová charakteristika rovna nule. [2]

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (13)$$

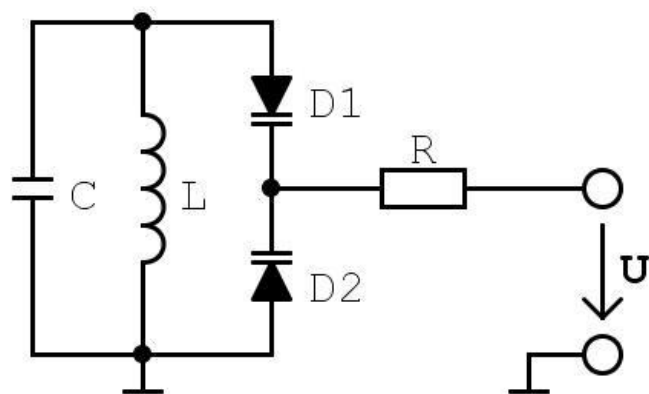


Obrázek 2.11 Oscilátor s Wienovým článkem

2.5 Ladění pracovního kmitočtu oscilátoru

Změnu pracovního kmitočtu lze provést více způsoby. Z Thomsonova vztahu pro výpočet rezonančního kmitočtu vyplývá, že frekvenci lze měnit změnou reaktancí rezonančního obvodu.

Pro přeladění kmitočtu oscilátoru může být použit otočný kondenzátor či cívka s posuvným jádrem. Nejčastěji se pro přeladění používá kapacitní dioda – varikap. Jedná se o diodu, která po přivedení napětí v závěrném směru mění v určitém rozsahu svou kapacitu. Připojením varikapu k obvodu a následnou změnou řídicího napětí se mění rezonanční kmitočet. Obvody s oscilátory, kde se používá zmíněný způsob ladění se nazývají napětím řízené (VCO – Voltage Controlled Oscillator). [1]



Obrázek 2.12 Ladění rezonančního obvodu varikapem

3 NÁVRH PŘÍPRAVKU

3.1 Návrh oscilátoru s Wienovým článkem

Výchozí schéma pro návrh se nachází v kapitole 2.4.1. Operační zesilovač byl zvolen typu TL071 se symetrickým napájením $\pm 12\text{V}$. Pro možnost přeladění se uvažuje možnost použité dvojného digitálního potenciometru s odporem $10\text{k}\Omega$. Do série s digitálním potenciometrem je připojen odpor $5,1\text{k}\Omega$.

Minimální oscilační kmitočet

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

Ze zvolené hodnoty kondenzátoru a celkového odporu byla dopočítána velikost minimálního oscilačního kmitočtu následovně:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 15,1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}} = 10540 \text{ kHz} \quad (15)$$

Maximální oscilační kmitočet

Maximální oscilační kmitočet je určen kondezátorem a samotným odporem $5,1\text{k}\Omega$, z toho vyplývá velikost oscilačního kmitočtu:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 5,1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}} = 31206 \text{ kHz} \quad (16)$$

Nastavení zesílení operačního zesilovače

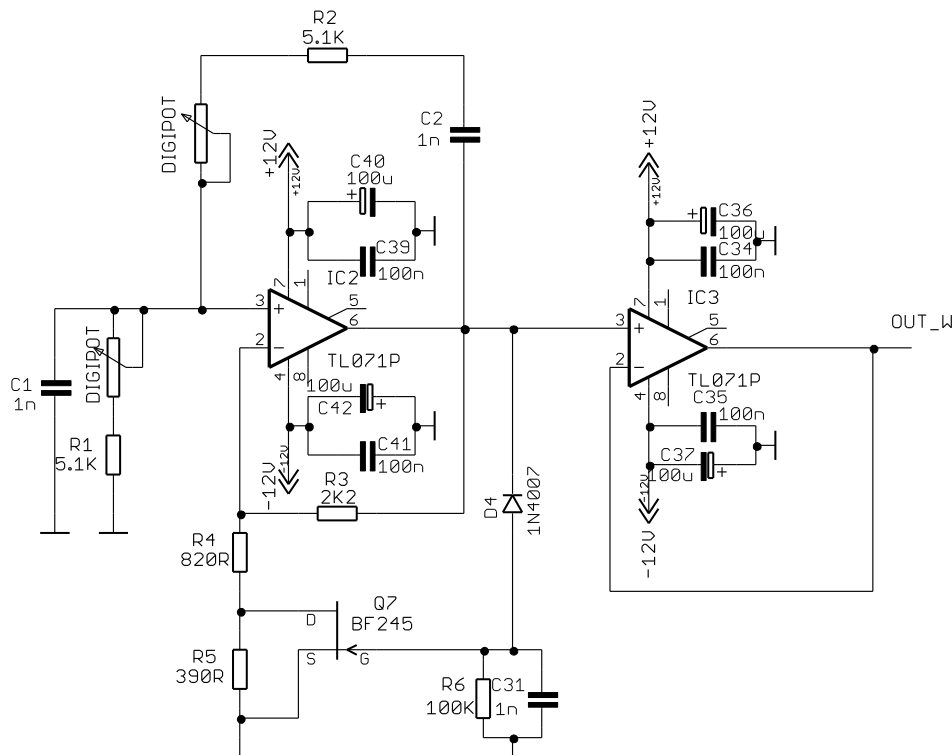
Pro oscilátor byl navržen obvod automatického řízení zesílení (AGC) pomocí FET tranzistoru, který se chová jako odpor řízený pomocí napětí na řídící elektrodě gate U_{GS} . Toto napětí musí být usměrněno a vyfiltrováno. V tomto zapojení byl použit tranzistor BF245 (BF256). Pro snadné nasazení kmitů bylo počáteční zesílení zvoleno na hodnotu $A = 3,1$. Po nárůstu výstupního napětí, které uzavře tranzistor ($R_{DS} \gg R_5$), zesílení poklesne na hodnotu $A = 2,9$. Pro nulové napětí na gate tranzistoru byl z katalogového listu zjištěn odpor $R_{DS} = 200 \Omega$ [4]. Z následujících podmínek byly dopočítány hodnoty zpětnovazebních odporů.

$$A(3,1) = \frac{R_3 + R_4 + R_5 // R_{DS}}{R_4 + R_5 // R_{DS}} \quad (17)$$

$$A(2,9) = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_4 + R_5} \quad (18)$$

Pro $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ byly z uvedených vztahů vypočteny následující hodnoty:

$$R_2 = 838 \Omega, R_3 = 383 \Omega.$$



Obrázek 3.1 Oscilátor s Wienovým článkem - úplné zapojení

3.2 Návrh Colpittsova oscilátoru

Výchozí schéma pro návrh Colpittsova oscilátoru je uvedeno v kapitole 2.3.3.

Toto zapojení vyžaduje doplnění obvodu nastavující pracovní bod tranzistoru. Do zapojení byl zvolen tranzistor BC548B pracující ve třídě A. Pro návrh bylo zvoleno napájecí napětí 12V a proud kolektoru I_C 5mA. Z katalogového listu byl zjištěn parametr $\beta_{MIN} = 200$. Výstupní signál oscilátorů je odebírán přes tranzistorový stupeň SC. [5]

Nastavení pracovního bodu tranzistoru

V návrhu je použito zapojení tranzistoru se společným emitorem s můstkovou stabilizací pracovního bodu. Velikosti rezistorů pro nastavení pracovního bodu byly určeny pomocí následujících vztahů:

$$R_E = \frac{U_{CC}/10}{I_C} = \frac{1,2}{5 \cdot 10^{-3}} = 240 \, \Omega \quad (19)$$

$$R_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{Re}}{5 \cdot \frac{I_C}{\beta}} = \frac{12 - 0,65 - 1,2}{5 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200}} = 82,5 \, \text{k}\Omega \quad (20)$$

$$R_{B2} = \frac{U_{BE} + U_{Re}}{4 \cdot \frac{I_C}{\beta}} = \frac{0,65 + 1,2}{5 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200}} = 18,5 \text{ k}\Omega \quad (21)$$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE} - U_{Re}}{I_C} = \frac{12 - 6}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \text{ k}\Omega \quad (22)$$

Použité rezistory v zapojení byly zaokrouhleny podle řady E24 následovně:

Tabulka 1 Zaokrouhlené hodnoty do řady E24

Označení	Velikost odporu [Ω]
R_e	270
R_{B1}	82k
R_{B2}	18k
R_C	1,2k

Zpětná vazba

Zpětnou vazbu tvoří kapacitní dělič. Jeho poměr byl určen na hodnotu 1 s ohledem na zesílení tranzistoru. Hodnota kondenzátoru C_1 byla zvolena na 470pF.

$$\beta = \frac{C_2}{C_1} = 1 \Rightarrow C_2 = C_1 = 470 \text{ pF} \quad (23)$$

Parametry rezonančního obvodu

Při návrhu byla zahrnuta možnost přeladění kmitočtu oscilátoru pomocí kapacitních diod způsobem uvedeným v kapitole 2.5. Zapojení je rovnocenné se schématem na obr. 2.12. Pro návrh bylo použito dvou kapacitních diod typu BB640. Rozsah ladícího napětí byl uvažován v rozmezí 0 – 5V. [8]

$$C_D = \frac{C_{D1} C_{D2}}{C_{D1} + C_{D2}} = \frac{76 \cdot 10^{-12} \cdot 76 \cdot 10^{-12}}{76 \cdot 10^{-12} + 76 \cdot 10^{-12}} = 38 \text{ pF} \quad (24)$$

Celková kapacita zpětnovazebního děliče:

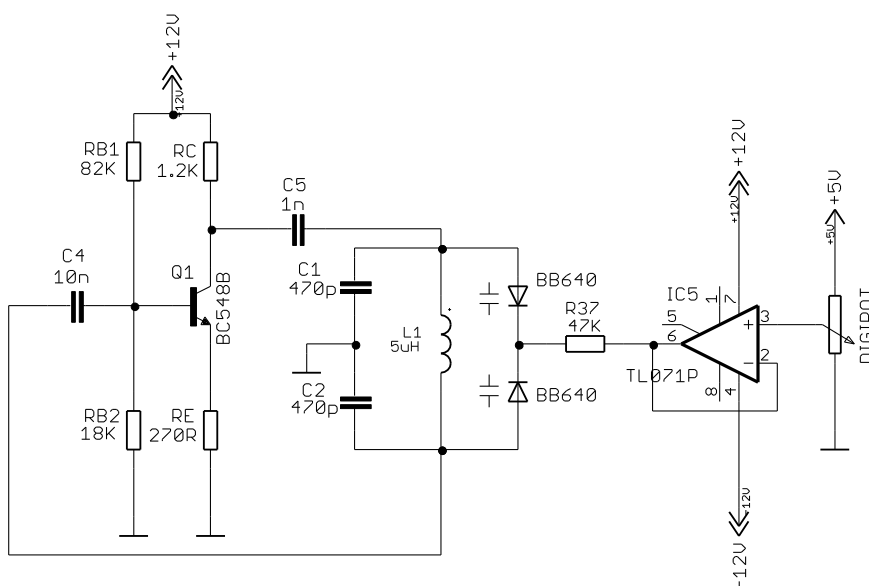
$$C_{C1,2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{470 \cdot 10^{-12} \cdot 470 \cdot 10^{-12}}{470 \cdot 10^{-12} + 470 \cdot 10^{-12}} = 235 \text{ pF} \quad (25)$$

Potom se celková kapacita rezonančního obvodu určí následovně:

$$C_{CELK} = C_{C1,2} + C_D = 235 + 38 = 273 \text{ pF} \quad (26)$$

Ze zvolených hodnot oscilačního kmitočtu a velikosti celkové kapacity figurující v obvodu byla dopočítána velikost indukčnosti úpravou Thomsonova vztahu:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (5 \cdot 10^6)^2 \cdot 273 \cdot 10^{-12}} \cong 5 \mu\text{H} \quad (27)$$



Obrázek 3.2 Colpittsův oscilátor - úplné zapojení

3.3 Návrh Meissnerova oscilátoru

Výchozí schéma pro návrh Meissnerova oscilátoru je uvedeno v kapitole 2.2.2.

Nastavení pracovního bodu

Opět bylo použito nastavení pracovního bodu jako u Colpittsova oscilátoru.

Parametry rezonančního obvodu

Pro srovnání bylo u Meissnerova oscilátoru použito stejných hodnot součástek jako u předchozího Colpittsova oscilátoru.

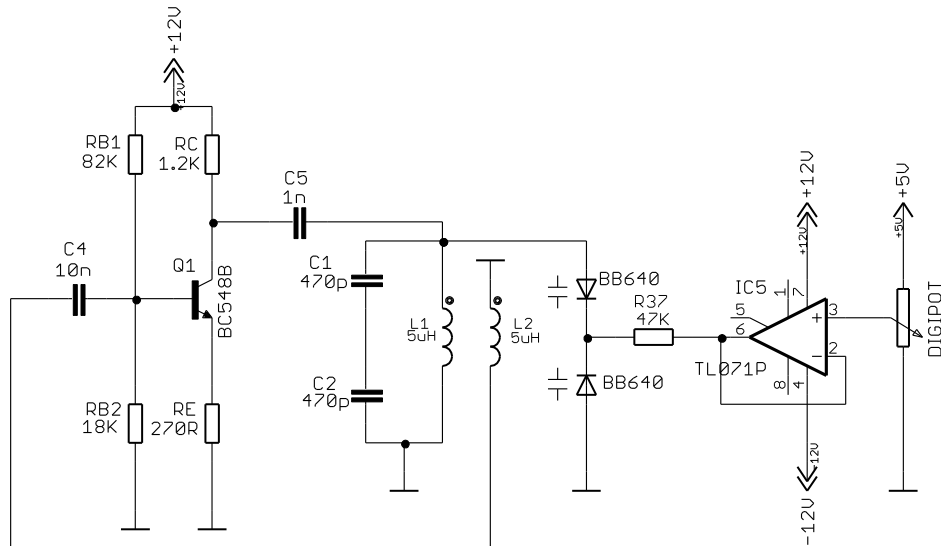
Zpětná vazba

Přenos zpětné vazby je určen poměrem indukčností sekundárního a primárního vinutí. Shodným nastavením pracovního bodu jako v předchozím návrhu musí být dodržen následující poměr:

$$\beta = \frac{L_v}{L} = 1 \quad (28)$$

Ze známého poměru a velikosti indukčnosti primárního vinutí byla dopočítána velikost indukčnosti sekundárního vinutí:

$$L_v = L = 5\mu\text{H} \quad (29)$$

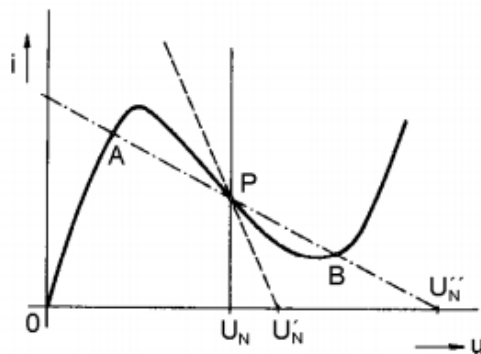


Obrázek 3.3 Meissnerův oscilátor - úplné zapojení

3.4 Návrh oscilátoru s tunelovou diodou

Nastavení pracovního bodu tunelové diody

Pro návrh byla zvolena tunelová dioda typu 1N3716. Typický průběh VA charakteristika tunelové diody se nachází na následujícím obrázku.



Obrázek 3.4 V-A charakteristika tunelové diody

Hodnoty charakteristických bodů VA charakteristiky tunelové diody byly zjištěny z katalogového listu. Tyto hodnoty byly použity k nastavení pracovního bodu tunelové diody do středu oblasti záporného diferenciálního odporu (na obrázku bod P). [11]

Tabulka 2 Významné hodnoty V-A charakteristiky tunelové diody

Peak Current	4,7 mA
Peak Voltage	65 mV
Valley Current	0,6 mA
Valley Voltage	350 mV

Ze zjištěných hodnot byl přibližně určen pracovní bod ($I_{TD} = 2,2 \text{ mA}$; $U_{TD} = 150 \text{ mV}$).

$$R_1 = \frac{U_{CC} - U_{TD}}{3I_{TD}} = \frac{5 - 0,15}{3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}} = 750 \Omega \quad (30)$$

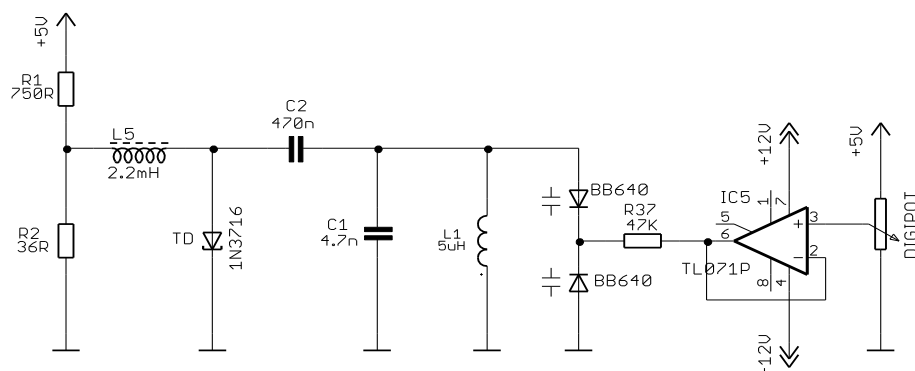
$$R_2 = \frac{U_{TD}}{2I_{TD}} = \frac{0,15}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}} = 36 \Omega \quad (31)$$

Pro oddělení obvodu nastavujícího pracovní bod a rezonančního obvodu byl použit vazební kondenzátor o velikosti 470 nF a tlumivka 2,2 mH.

Rezonanční kmitočet

Ze zvolených hodnot kondenzátoru a cívky se vypočítala hodnota rezonančního kmitočtu.

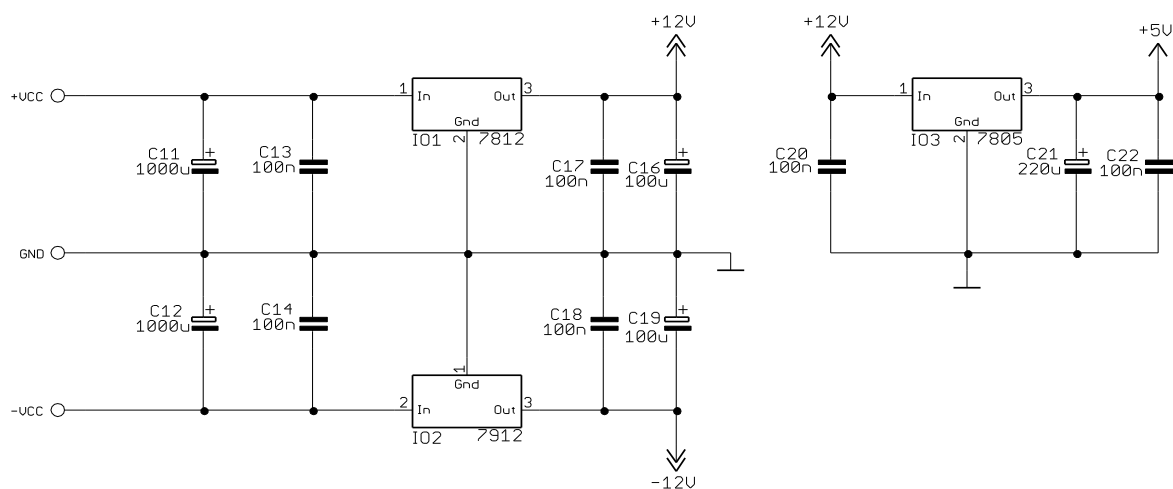
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5 \cdot 10^{-6} \cdot 4,7 \cdot 10^{-9}}} = 1,16 \text{ MHz} \quad (32)$$



Obrázek 3.5 Zapojení oscilátoru s tunelovou diodou

3.5 Napájení

Pro napájení přípravku bylo uvažováno použití symetrického zdroje $\pm 12V$. Přivedené napětí na vstupu je v obou větvích vyfiltrováno kondenzátory a přivedeno na vstupy stabilizátorů LM7812 resp. LM7912 pro zápornou větev. Na výstupu je stabilizované napětí opět filtrováno dvojicí kondenzátorů. Stabilizátor napětí LM7805 je připojen k $+12V$ větvi. Na jeho výstupu je stabilizované napětí $+5V$ potřebné k napájení mikroprocesoru a digitálních potenciometrů.

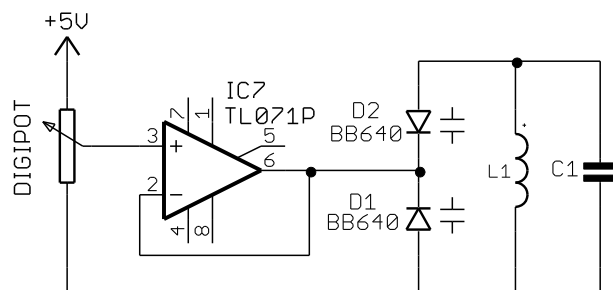


Obrázek 3.6 Stabilizátor napájecího napětí

3.6 Ladění kmitočtu

K dosažení možnosti přeladění byl zvolen princip uvedený v kapitole 2.5. Jedná se o sériové zapojení diod, jejichž kapacita se mění v závislosti na přivedeném závěrném napětí. Pro oddělení obvodu digitálního potenciometru a samotného LC obvodu byl použit operační zesilovač sloužící jako napěťový sledovač. Byly použity kapacitní diody typu BB640 s maximální kapacitou 76 pF. Tyto diody jsou laděny v rozsahu 0 – 5V. K řízení ladícího napětí dochází změnou polohy jezdce potenciometru.

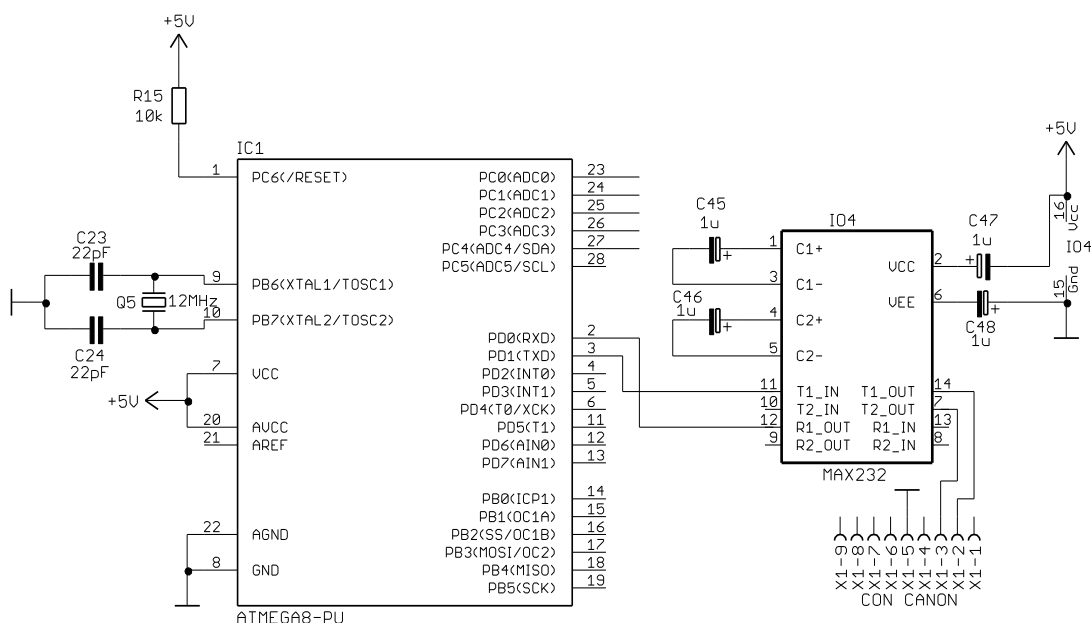
Pro realizaci byl použit integrovaný obvod MCP41050. Jedná se o digitálně řízený potenciometr umožňující komunikaci pomocí SPI. Velikost odporu jezdce je řízena osmibitovým vstupním slovem. Z toho vyplývá možnost nastavení 256 různých pozic jezdce potenciometru.[8]



Obrázek 3.7 Ladění kmitočtu

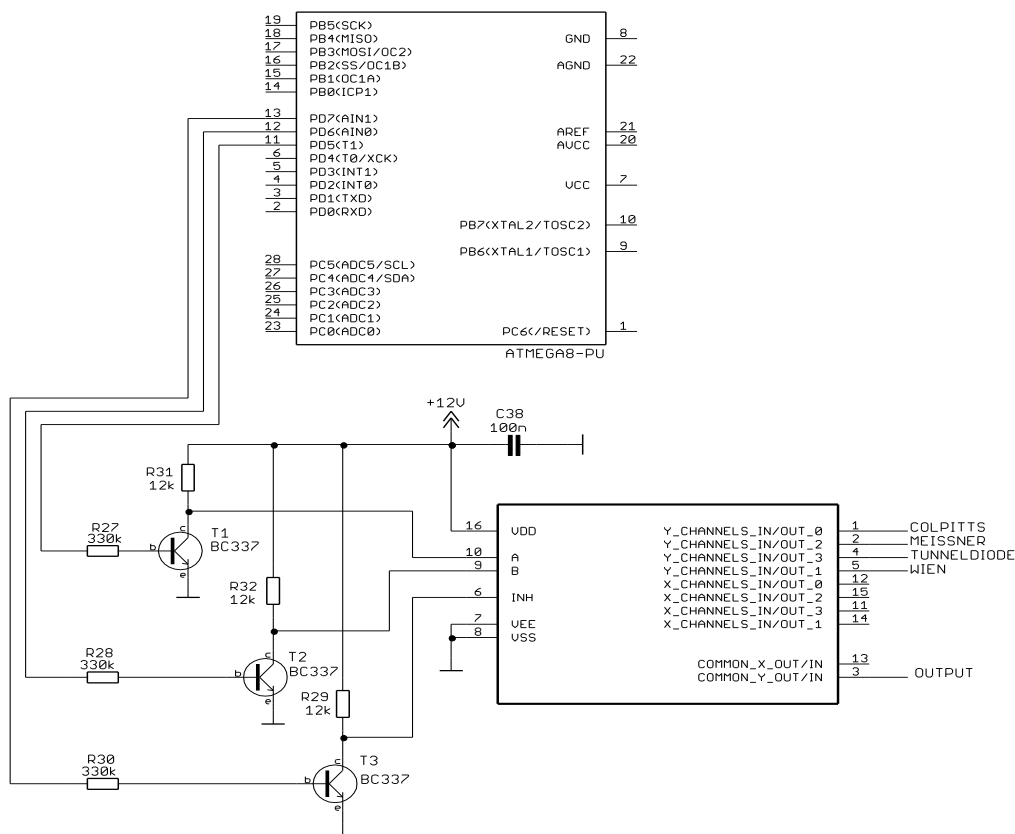
3.7 Řízení přípravku

Hlavním prvkem je mikroprocesor ATMEGA8A firmy Atmel. Jeho úkolem je řízení digitálních potenciometrů a komunikace s PC. Dále pak ve spojení s multiplexorem CD4052BE přepíná mezi generovaným signálem jednotlivých oscilátorů, který je přiveden na výstup přípravku. Komunikace mezi PC a přípravkem probíhá po sériové sběrnici RS232. Pro realizaci takovéto komunikace je potřeba použít externí převodník úrovní mezi sériovou linkou a úrovněmi TTL. K tomu slouží integrovaný obvod MAX232. Dále je mikroprocesor doplněn externím krystalovým oscilátorem 12 MHz, který umožní bezchybnou komunikaci. Dokumentace mikroprocesoru doporučuje připojit ke krystalu dvojici kondenzátorů o velikosti 22pF. [9][10][11]



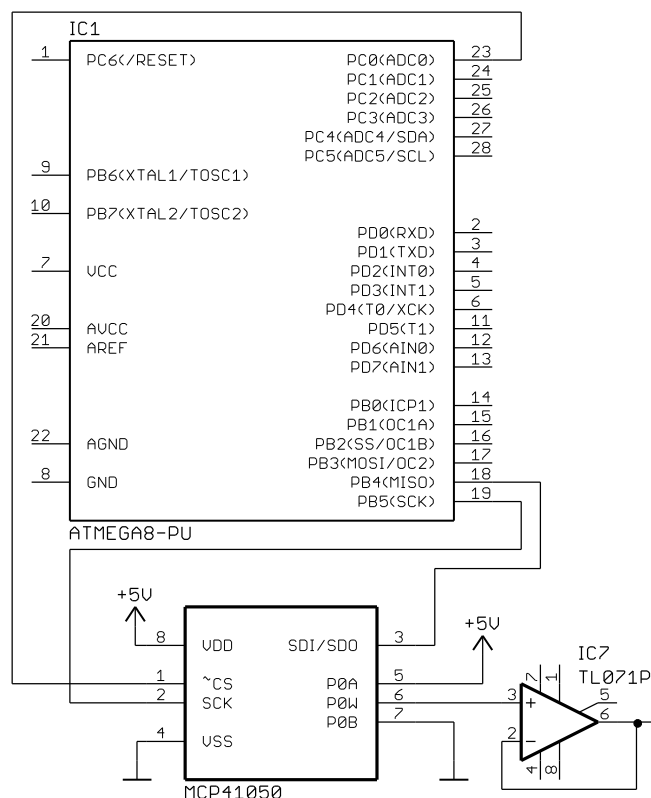
Obrázek 3.8 Zapojení MCU s převodníkem úrovní MAX232

Na následujícím obrázku je schéma mikroprocesoru a jeho připojení k multiplexoru. Do řídicí logiky mikroprocesoru a multiplexoru jsou zařazeny tři tranzistorové stupně zajišťující změnu výstupní úrovně 5V na 12V.



Obrázek 3.9 Schéma zapojení MCU a multiplexoru

Na dalším obrázku je schéma zapojení mikroprocesoru a digitálního potenciometru MCP41050, ze kterého je napětí odebíráno přes sledovač. Každý oscilátor má vlastní digitální potenciometr. Pro přeladění Wienova oscilátoru bylo použito dvojného digitálního potenciometru MCP42010.



Obrázek 3.10 Schéma zapojení MCU a dig. potenciometru

3.8 Programová část

3.8.1 Program mikroprocesoru

Obslužný program mikroprocesoru byl vytvořen pro splnění následujících požadavků: řízení digitálních potenciometrů pomocí SPI, řízení multiplexoru a komunikace s PC pomocí sběrnice RS232.

Základním informačním pramenem při zpracování programu byly dokumentace mikroprocesoru ATMEGA8A a digitálního potenciometru MCP41050. [8][9]

V první fázi je potřeba inicializovat komunikaci mikroprocesoru s periferiemi pomocí sériových rozhraní SPI a UART. Hierarchie je v tomto přípravku stanovena tak, že řídicím zařízením (Master) je mikroprocesor, který ovládá digitální potenciometry (Slave). Komunikace SPI je realizována pomocí třech vodičů: datový vodič MOSI, zdroj hodinového signálu SCK a volba zařízení CS. [9]

Komunikace s PC je zajištěna pomocí sériového rozhraní UART. Za tímto účelem byl mikroprocesor doplněn o převodník úrovní MAX232. Komunikace probíhá v módu 8N1, tzn. vysílá se 8 datových bitů, 1 stop bit a nevyužívá se parity. Přenosová rychlost je nastavena na 9600 Baud.

Po inicializaci výše zmíněných rozhraní mikroprocesor nevykonává žádnou činnost. Ovládání je řízeno v přerušování, které informuje o přijaté informaci z počítače. Komunikace s PC je rozdělena do tří částí:

1) Autorizace zařízení

Mikroprocesor čeká na definované vstupní slovo odeslané z PC. Pokud je toto slovo přijato, informuje PC o jeho správnosti a dále může probíhat řízení přípravku. Tato část má za úkol informovat obsluhu o úspěšném navázání spojení přípravku a PC na daném portu COM.

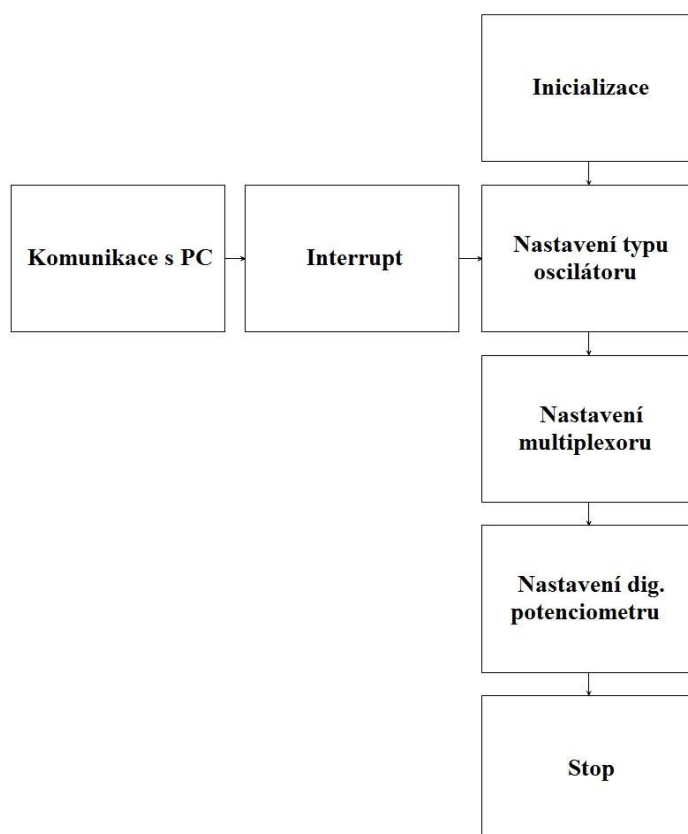
2) Nastavení typu oscilátoru

Po navázání spojení probíhá komunikace vysláním dvou bajtů. První bajt obsahuje informaci o laděném typu oscilátoru.

3) Nastavení digitálního potenciometru

V druhém bajtu přichází informace o nastavení polohy jezdce potenciometru. Před samotným zápisem hodnoty jezdce musí být mikroprocesorem vyslán do příslušného potenciometru řídicí bajt (Command Byte), informující o následující operaci zápisu do jeho paměti. [8]

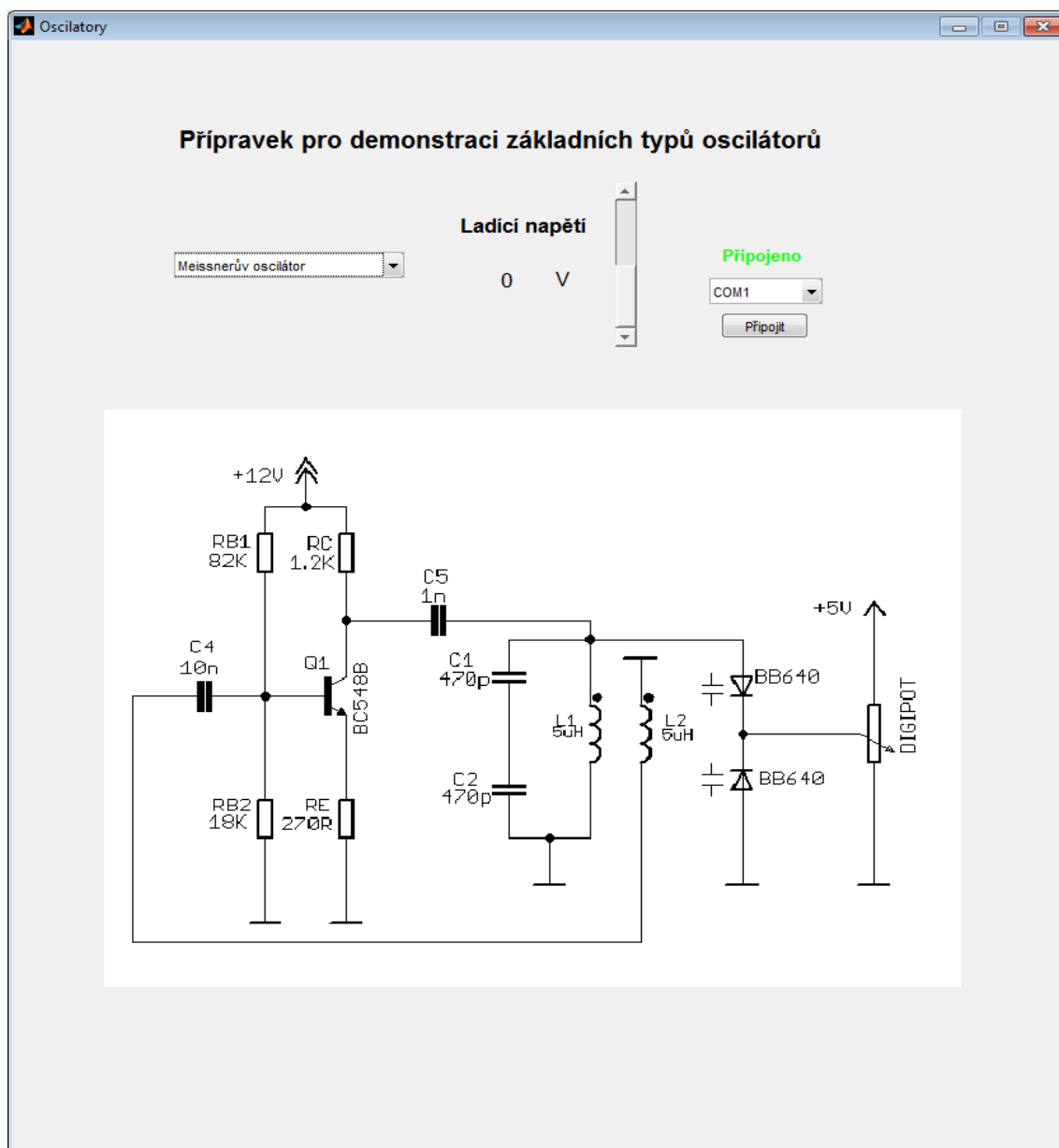
Celý zdrojový kód je umístěn v elektronické příloze. Na následujícím obrázku je vývojový diagram programu pro mikroprocesor.



Obrázek 3.11 Vývojový diagram programu pro MCU

3.8.2 Obslužný program pro PC

Pro snadnou obsluhu přípravku bylo vytvořeno jednoduché grafické uživatelské rozhraní v programovém prostředí MATLAB. Program obsahuje menu s výběrem jednotlivých typů oscilátorů a jezdec pro nastavení velikosti odporu jezdece. Programu umožňuje volbu COM portu a testovací tlačítko, pomocí kterého se program snaží o navázání komunikace s přípravkem. Úspěšné navázání spojení je indikováno stavem „Připojeno“. Poté lze přepínat mezi jednotlivými výstupy a měnit hodnotu jezdece potenciometru. Samotné vyslání informace k přípravku probíhá po každém zaznamenaném posunu jezdece.



Obrázek 3.12 Uživatelské rozhraní obslužného programu pro PC

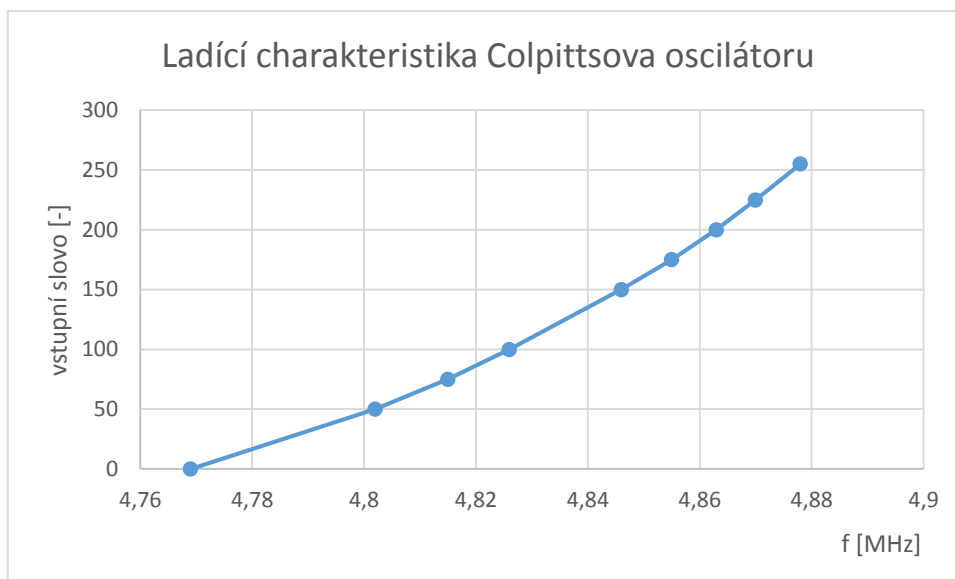
4 MĚŘENÍ

4.1 Měření Colpittsova oscilátoru

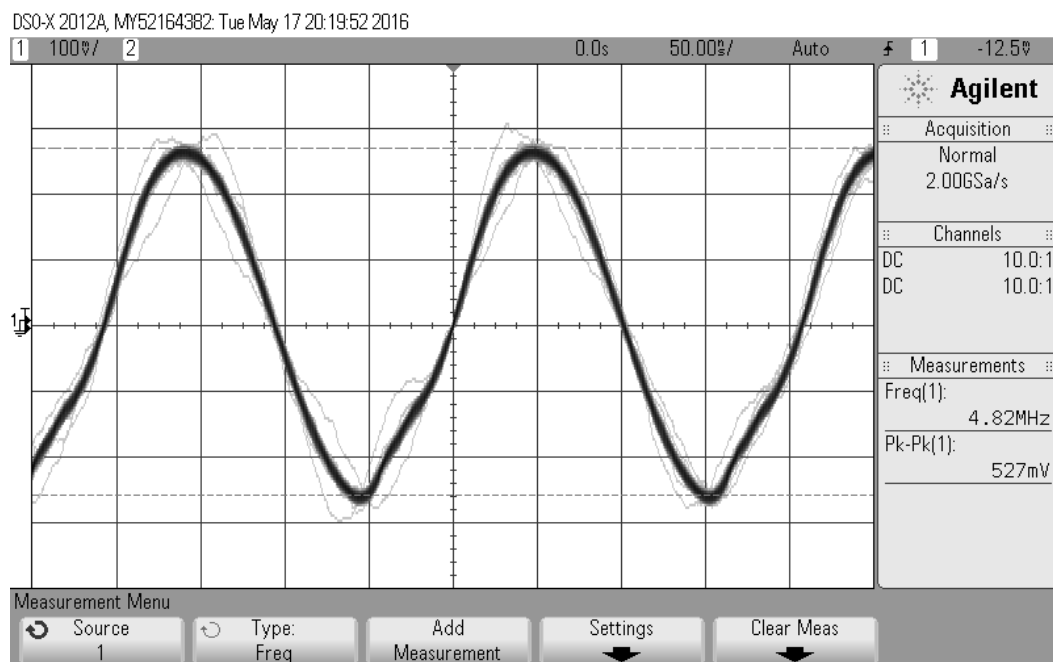
Byla změřena závislost přeladění Colpittsova oscilátoru pro definovaná vstupní slova.

Tabulka 3 Hodnoty ladící charakteristiky Colpittsova oscilátoru

Vstupní slovo	0	50	75	100	150	175	200	225	255
f [MHz]	4,769	4,802	4,815	4,826	4,846	4,855	4,863	4,87	4,878



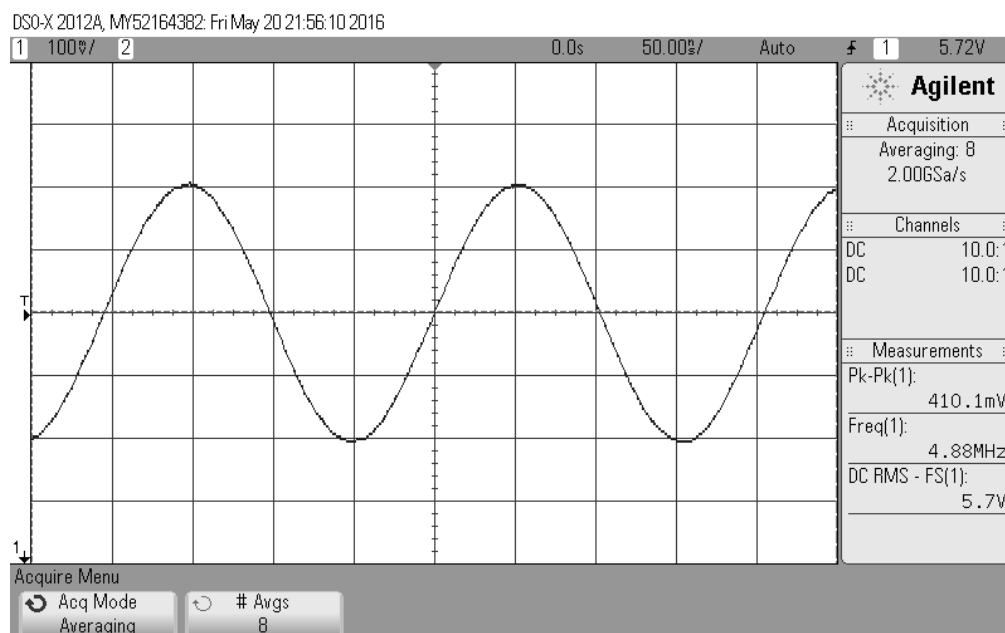
Obrázek 4.1 Graf závislosti frekvence a vstupního slova



Obrázek 4.2 Colpittsův oscilátor - změřený průběh výstupního napětí

4.2 Měření Meissnerova oscilátoru

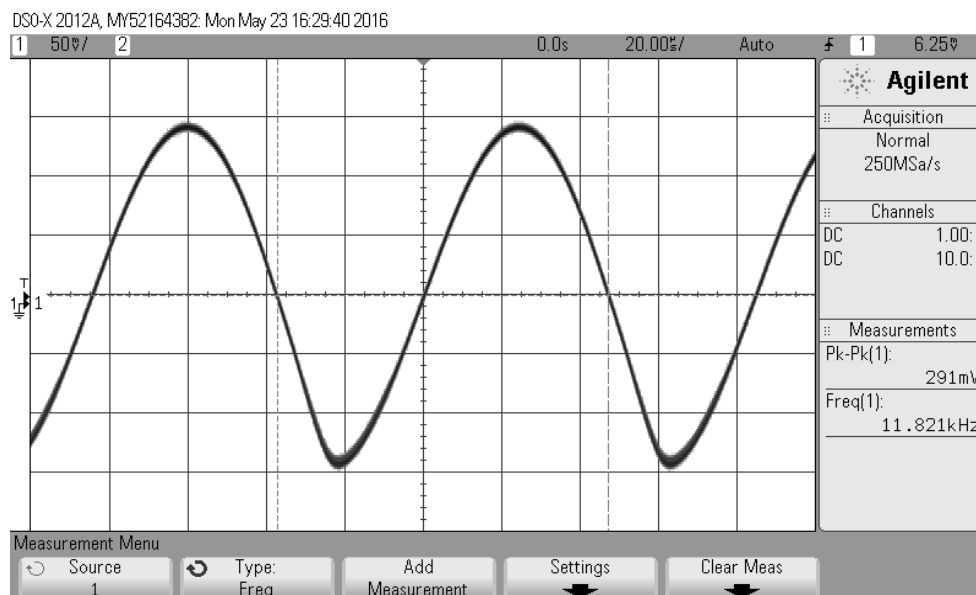
Byl změřen výstupní průběh Meissnerova oscilátoru.



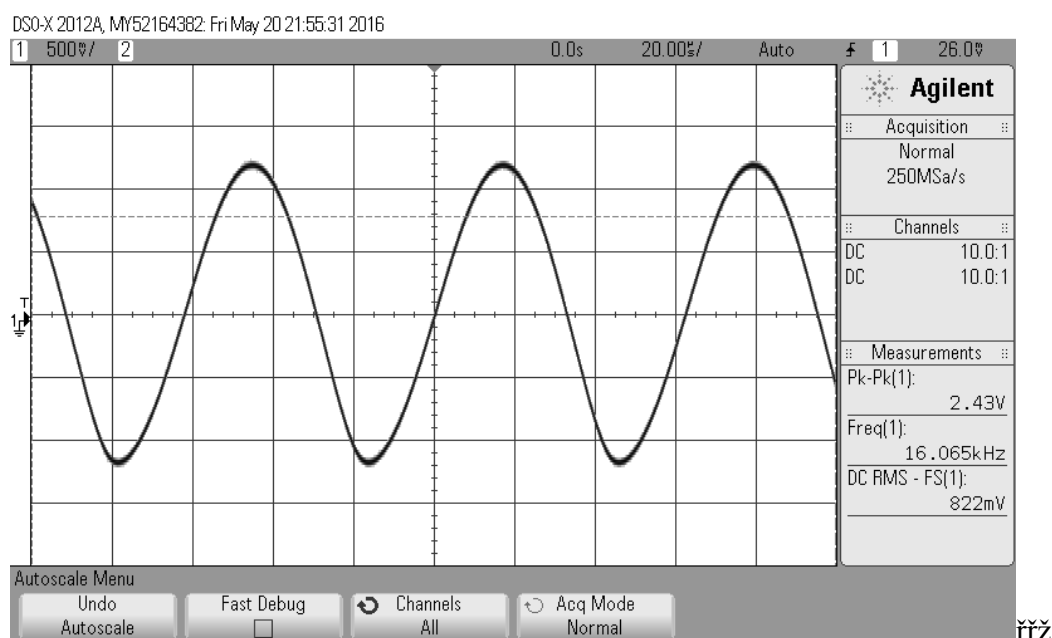
Obrázek 4.3 Meissnerův oscilátor - změřený průběh výstupního napětí

4.3 Měření Wienova oscilátoru

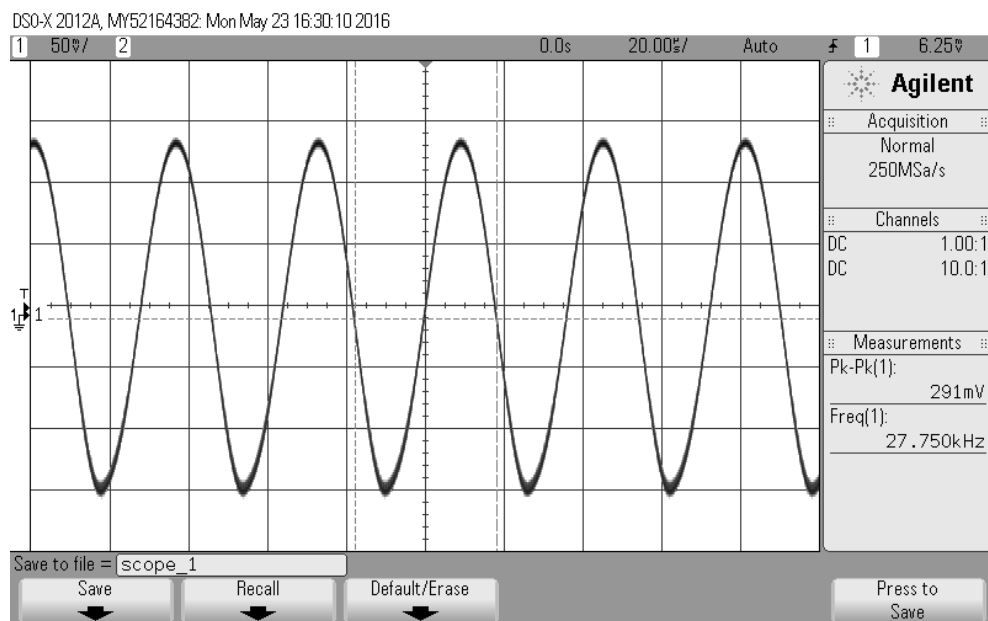
Byly změřeny výstupní průběhy Wienova oscilátoru pro nejnižší, střední a nejvyšší dosažitelnou frekvenci daného zapojení. Byla taktéž proměřena ladící charakteristika oscilátoru v závislosti na vstupním slově dvojného digitálního potenciometru. Oproti předchozím zapojením se jedná o nízkofrekvenční oscilátor.



Obrázek 4.4 Wienův oscilátor – výstupní průběh na nejnižší frekvenci



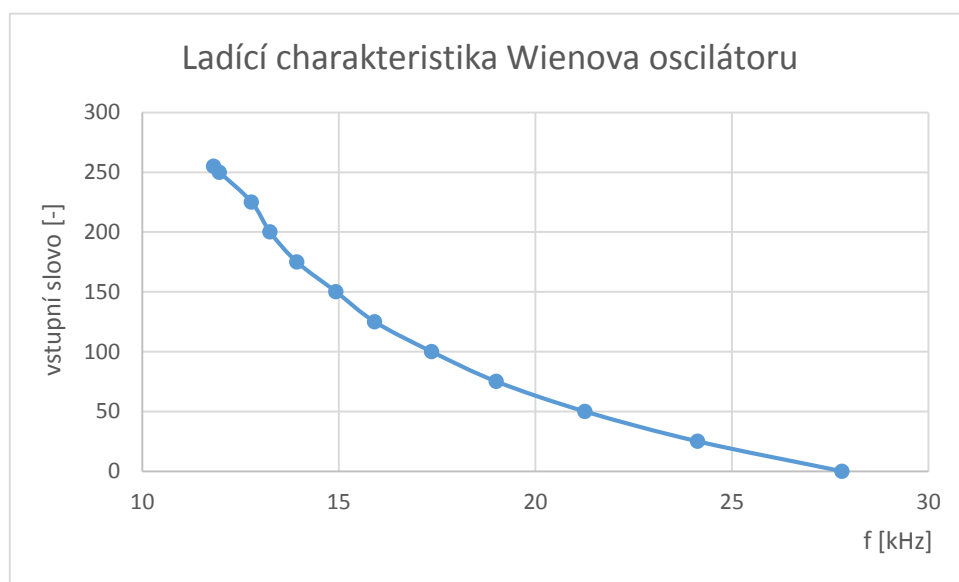
Obrázek 4.5 Wienův oscilátor – výstupní průběh na střední frekvenci



Obrázek 4.6 Wienův oscilátor – výstupní průběh na nejvyšší frekvenci

Tabulka 4 Hodnoty ladící charakteristiky Wienova oscilátoru

Vstupní slovo	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	255
f [kHz]	27,8	24,13	21,26	19,01	17,36	15,91	14,93	13,93	13,25	12,78	11,96	11,82



Obrázek 4.7 Wienův oscilátor - graf závislosti frekvence a vstupního slova

5 ZÁVĚR

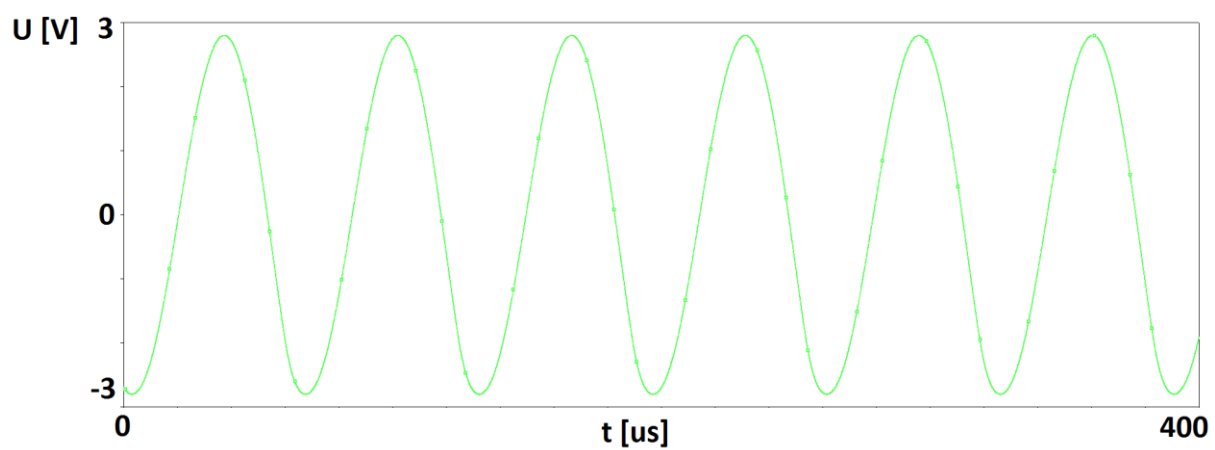
Zadání bakalářské práce se podařilo z části splnit. V semestrálním projektu byl proveden návrh čtyř různých zapojení oscilátorů a jejich simulace. V bakalářské práci byl nahrazen Hartleyho oscilátor zapojením s tunelovou diodou. Po navázání práce na semestrálním projektu byly a navrženy další pomocné obvody k přípravku (napájení, obvod ladění kmitočtu a komunikace s PC). Pro přeladění kmitočtu LC oscilátoru byly použity kapacitní diody ve spojení s digitálními potenciometry. Přeladění RC oscilátoru bylo realizováno změnou velikostí odporů Wienova článku pomocí dvojného digitálního potenciometru. Řízení celého přípravku bylo vyřešeno pomocí mikroprocesoru, pro který byl vytvořen program zahrnující komunikaci s digitálními potenciometry a PC. Dále bylo vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní pro komunikaci s mikroprocesorem a následné řízení digitálních potenciometrů. Po návrhu desky plošného spoje a konstrukci přípravku bylo provedeno měření výstupních průběhů a ladících charakteristik. U Colpittsova oscilátoru byl změřen značně zkreslený průběh oproti předpokladu ze simulace daného obvodového zapojení. Průběhy Wienova a Meissnerova oscilátoru jsou srovnatelné se simulovanými průběhy. Přípravek je schopen komunikovat s PC a pomocí programu ladit frekvenci jednotlivých oscilátorů. Na přípravku se nepodařilo oživit oscilátor s tunelovou diodou a obvod multiplexoru, průběhy tak musejí být měřeny v konkrétních bodech přípravku. V programovém řešení chybí možnost snímání výstupního průběhu do PC.

LITERATURA

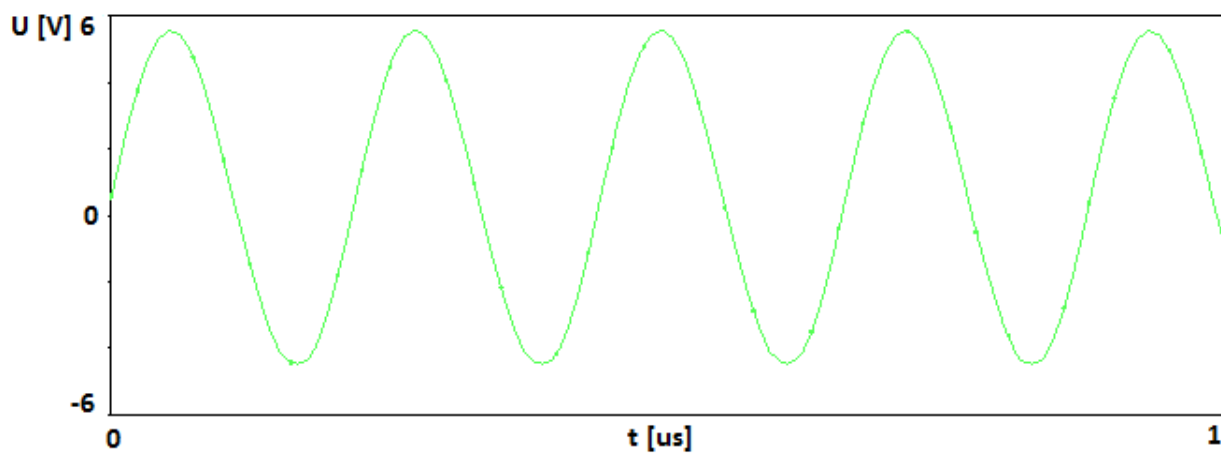
- [1] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky*. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002, 210 s. ISBN 80-214-2222-X.
- [2] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 479 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [3] BRANČÍK, Lubomír a Tomáš DOSTÁL. *Analogové elektronické obvody: přednášky* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007, 125 s. [cit. 2015-12-16]. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [4] NXP. BF245A [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BF245A-B-C.pdf
- [5] FAIRCHILD. BC547A [online]. 2014. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/datasheets/BC/BC547.pdf>
- [6] INFINEON. BB640 [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BB640SERIES-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304313d846880113d9d5b10c0172
- [7] Germanium Power Devices Corp. 1N3716[online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.datasheetpdf.com/datasheet/download.php?id=543447>
- [8] MICROCHIP. MCP41XXX/42XXX [online]. 2009. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/20797c9bd8b0f5b051b3cc0cfe7a65e8/mcp41050.pdf>
- [9] Atmel. ATMEGA8A [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. MAX232[online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. CD4052BE[online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2018727.pdf>
- [12] OrCAD PSpice. [online]. 16.6 Lite – [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.orcad.com/>

A SIMULACE ZAPOJENÍ

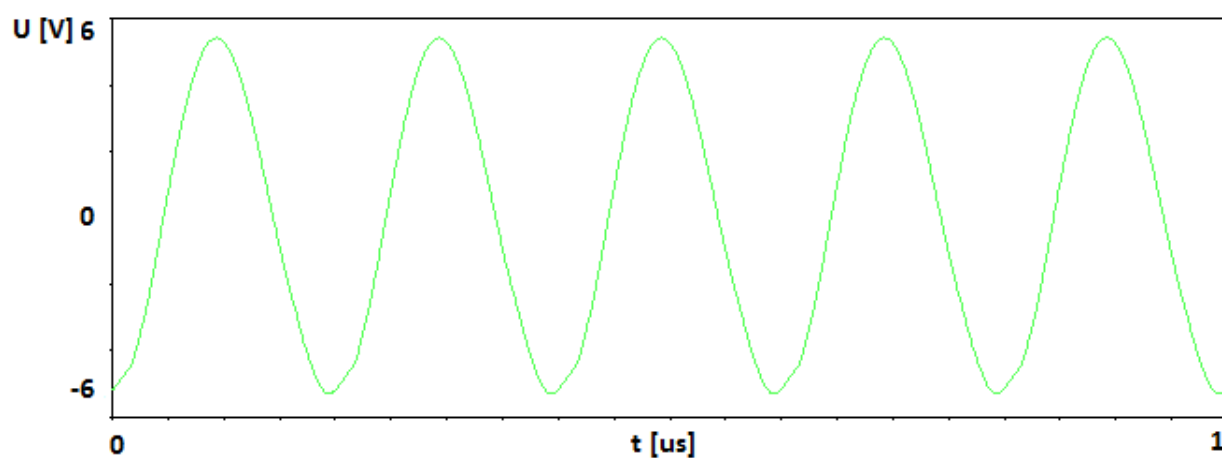
A.1 Simulace oscilátoru s Wienovým článkem



A.2 Simulace Colpittsova oscilátoru

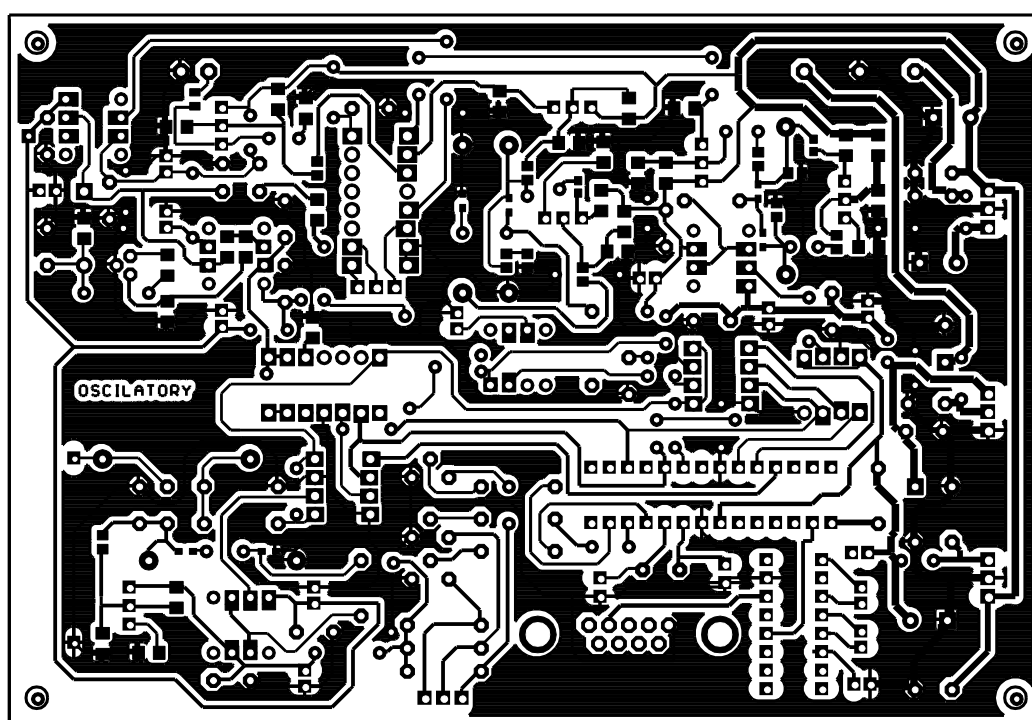


A.3 Simulace Meissnerova oscilátoru



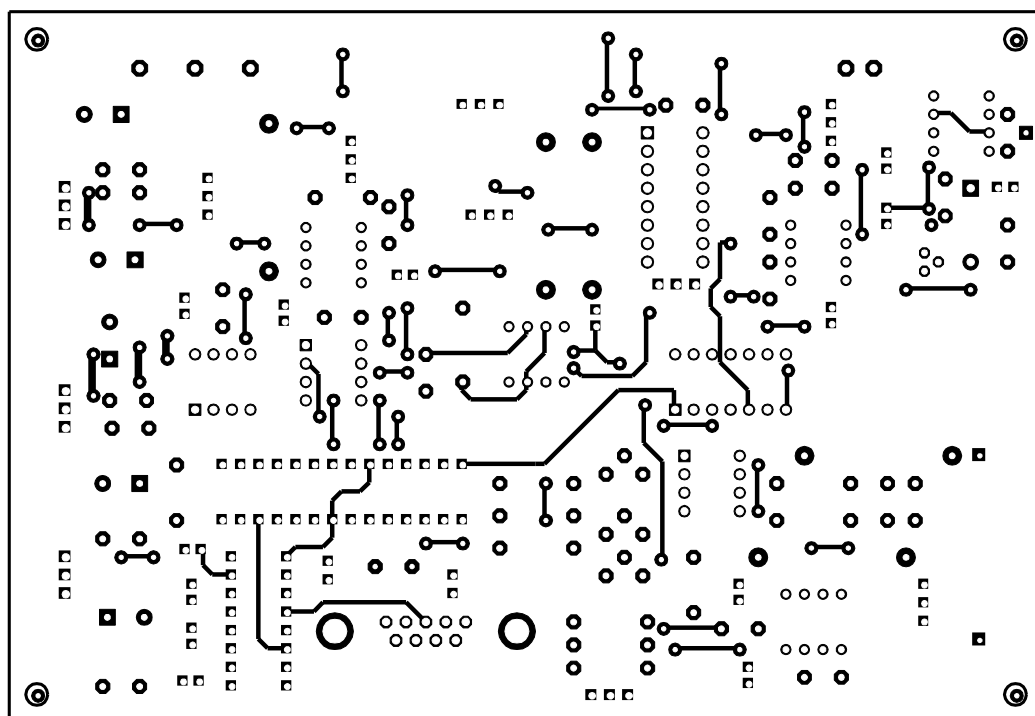
B NÁVRH ZAŘÍZENÍ

B.1 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)

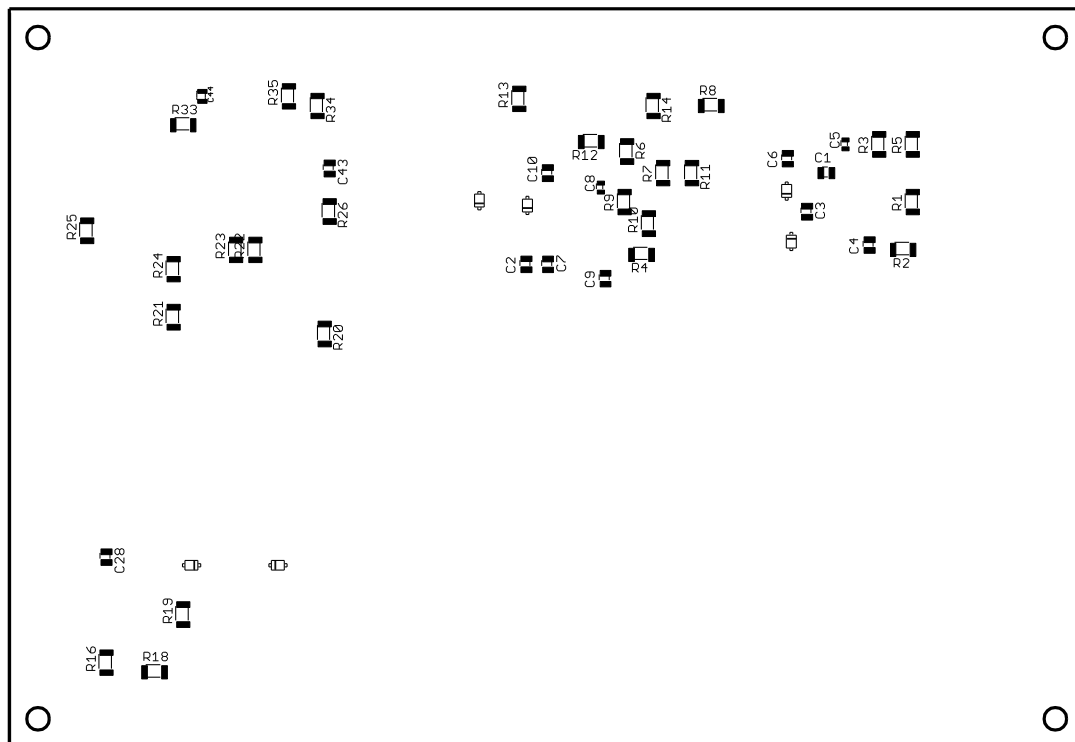


Rozměr desky 142x98 mm

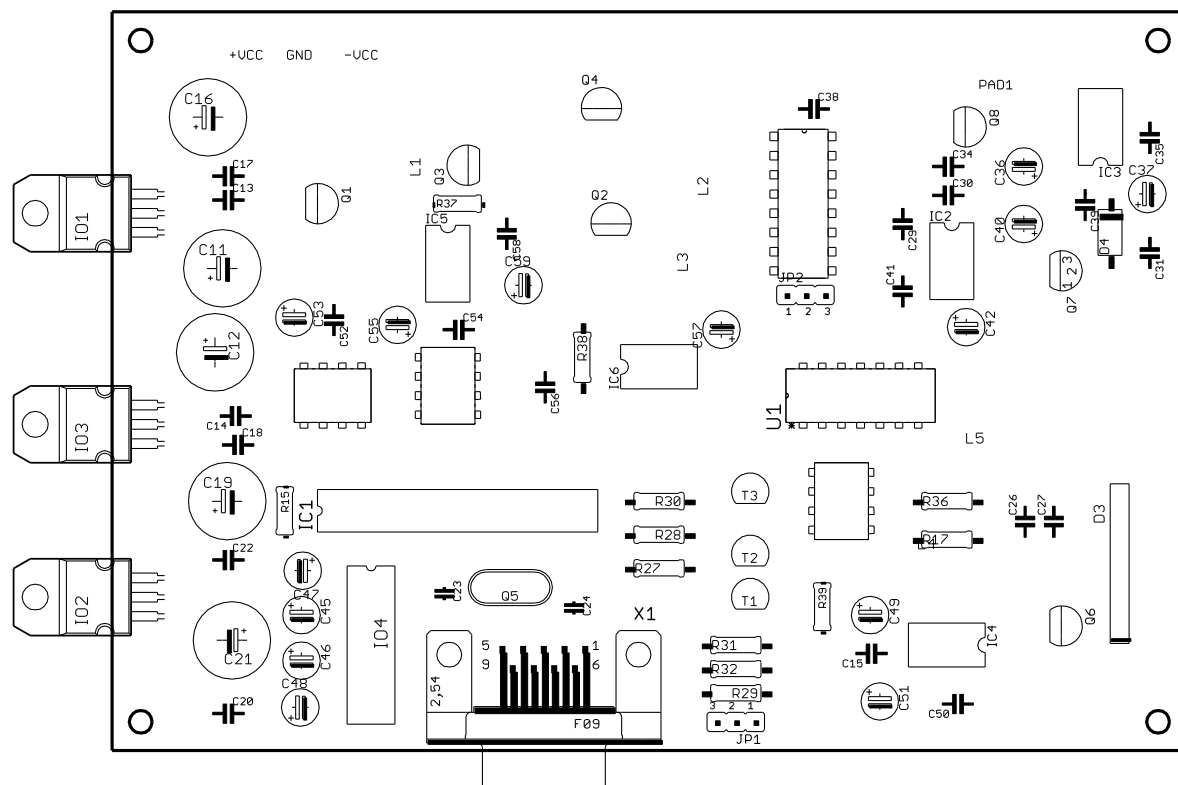
B.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



B.3 Osazovací plán – strana bottom



B.4 Osazovací plán – strana top



B.5 Seznam součástí

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
1		F09HP	X1	konektor RS232
2		JP2	JP1, JP2	JUMPER
2	1.2k	R1206	R3, R9	Rezistor
2	1000u	C-EL_5	C11, C12	Kondenzator - elektrolytický
1	100k	R1206	R25	Rezistor
17	100n	C-5	C13, C14, C15, C17, C18, C20, C22, C34, C35, C38, C39, C41, C50, C52, C54, C56, C58	Kondenzator - keramický
10	100u	C-EL_2	C36, C37, C40, C42, C49, C51, C53, C55, C57, C59	Kondenzator - elektrolytický
2	100u	C-EL_5	C16, C19	Kondenzator - elektrolytický
1	10k	R-7,5	R15	Rezistor
1	10n	C0805	C4	Kondenzator - keramický

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
1	12MHz	HC-49U	Q5	Krystal
3	12k	R-10	R29, R31, R32	Rezistor
2	18k	R1206	R1, R4	Rezistor
1	1N3716	DO41	D3	Tunelová dioda
1	1N4007	DO41	D4	Usměrnovací dioda - 1A, 1000V
2	1n	C0603	C5, C8	Kondenzátor - keramický
6	1n	C0805	C6, C9, C10, C28, C43, 44	Kondenzátor - keramický
1	1n	C0805	C44	Kondenzátor - keramický
3	1n	C-5	C29, C30, C31	Kondenzátor - keramický
4	1u	C-EL_2	C45, C46, C47, C48	Kondenzátor - elektrolytický
1	2.2k	R1206	R23	Rezistor
1	220u	C-EL_5	C21	Kondenzátor - elektrolytický
2	22pF	C-2,5	C23, C24	Kondenzátor - keramický
2	270R	R1206	R2, R6	Rezistor
4	3.3k	R1206	R8, R13, R18, R34	Rezistor
1	2.2mH	CIVKA	L5	Tlumivka
3	330k	R-10	R27, R28, R30	Rezistor
1	36R	R-10	R36	Rezistor
1	390R	R1206	R21	Rezistor
1	4.7n	C-5	C27	Kondenzátor - keramický
1	470n	C-5	C26	Kondenzátor - keramický
4	470p	C0805	C1, C2, C3, C7	Kondenzátor - keramický
1	47k	R1206	R24	Rezistor
1	47k	R-10	R38	Rezistor
2	47k	R-7,5	R37, R39	Rezistor
2	5.1k	R1206	R20, R26	Rezistor
4	56k	R1206	R11, R14, R19, R35	Rezistor
4	5uH	CIVKA	L1, L2, L3, L4	Civka
2	7812,781	TO-220	IO1, IO2	Stabilizátor
1	7912	TO-220	IO3	Stabilizátor záporný
1	820R	R1206	R22	Rezistor
1	820R	R-10	R17	Rezistor
6	82k	R1206	R5, R7, R10, R12, R16, R33	Rezistor
1	ATMEGA8-PU	DIL28-3	IC1	mikroprocesor

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
6	BBY640	SOD-323F	D1, D2, D5, D6, D7, D8	kapacitní dioda
3	BC337	TO-92	T1, T2, T3	Tranzistor NPN
6	BC548B	TO92-EBC	Q1, Q2, Q3, Q4, Q6, Q8	Tranzistor NPN
1	BF245	TO92	Q7	N-Channel Junction FET
1	CD4052BE	DIP	U6	multiplexor
1	MAX232	DIL16	IO4	Prevodník - RS- 232/TTL
3	MCP41050- 502E/P	DIP14	U\$9, U\$47, U\$48	IC DGTL POT 50K,DIP-14
1	MCP42010- 502E/P	DIP14	U1	IC DGTL POT 10K 2CH,DIP-14
4	PAD_1	PAD_1	+VCC, -VCC, GND	Svorka
1	PAD_2	PAD_2	PAD1	Výstupní svorka
5	TL071P	DIL08	IC2, IC3, IC4, IC5, IC6	operační zesilovač